Osaka University Knowledge Archive

Title	N_2/SF_6混合ガス中の沿面フラッシオーバ特性とその特異性
Author(s)	上野, 秀樹; 中山, 博史
Citation	電気材料技術雑誌. 2000, 9(1), p. 16-21
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/81579
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

Osaka University

電気材料技術雑誌　第９巻第１号
J. Soc. Elect. Mat. Eng.　Vol.9,　No.1　２０００

N_2/SF_6混合ガス中の沿面フラッシオーバ特性とその特異性

上野　秀樹，中山　博史

姫路工業大学　工学部　電気工学科
〒671-2201 姫路市書写2167

Creeping Flashover Characteristics in N_2/SF_6 and Their Anomaly

Hideki UENO and Hiroshi NAKAYAMA

Department Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Himeji Institute of Technology
2167 Shosha, Himeji 671-2201, JAPAN

ABSTRACT

By the insertion of the solid dielectric barrier between the needle and the plane, only the negative creeping flashover voltage drastically was reduced by the admixture of SF_6 gas into N_2 gas, and a highly emissive region at the top of a creeping corona was found in their gas mixtures. The effect of SF_6 gas mixture turned from positive to negative depending on the gas pressure. On the corona extension on a small addition of SF_6, the creeping corona has been changed from broad and wide extension to a fine creeping path with an intensive region at its tip by increasing pressure. This change has been well corresponding to the turn of the gas mixture effect.

キーワード：SF_6/N_2混合ガス、沿面放電、パルス電圧

１．はじめに

六フッ化イオウ(SF_6)ガスは，優れた絶縁性能を有することから，ガス絶縁開閉装置(GIS)や管路気中送電路(GIL)等の電力機器に利用され，その小型化や信頼性の向上に貢献してきた[1]。

一方，金属導体表面の突起や金属異物の混入や急峻波サージ電圧の侵入により局部的に不平等電界が発生した場合，SF_6ガスの絶縁耐力が著しく低下することが知られている[2,3]。これの問題を解決することは，今後の電力機器の小型化・高電界化，信頼性向上において重要である。

さらに，温暖化係数はCO_2ガスの2万倍以上であるため[4]，近年SF_6ガスの排出量は未だ少ないものの，排出規制対象となっている。したがって，SF_6を用いた電力機器の絶縁方式においても環境問題の点からの対応も求められている。

このような背景から，SF_6の代替ガスに関する研究が行われてきた。特に，SF_6等の電気的負性ガスとN_2ガス等のバッファガスとの混合ガスについて，その平等電界下での絶縁特性に関する研究は数多く行われている[5-9]。その結果，N_2/SF_6混合ガスや高気圧N_2ガスがSF_6ガスに替わる絶縁媒体として，その実用化が期待されている。ところが，不平等電界下では，絶縁破壊過程には，コロナ安定化作用が影響を及ぼすため，その破壊特性は複雑である。渡辺らやSafarらはN_2/SF_6等の混合ガス中，不平等長ギャップ下における破壊特性を報告しているが[10,11]，微小ギャップにおける特性は明らかではない。

一般に，電力機器では絶縁ガスと固体絶縁物の複合絶縁構成となっている。このため，複合絶縁構成における沿面放電特性に関する研究も多くなされている[12]。筆者らは急峻波を用いて不平等電界微小ギャップで，SF_6やその混合ガスの放電特性や沿面放電特性の研究を行ってきた[13-16]。その中で，N_2ガスに電気的負性ガス（SF_6ガス，O_2ガス）を微量混合すると負極性沿面フラッシオーバ電圧が大きく低下することを見い出した[17-20]。本研究では，沿面フラッシオーバ電圧の混合比依存性，コロナの発生とその進展について調べ，N_2/SF_6混合ガス中における沿面フラッシオーバ特性の特異性とその起源について検討を行った結果について述べる。

２．実験方法

本実験に用いた複合絶縁構成の電極配置を図1に示す。上部電極には先端曲率半径約35μmの針を，下部電極には大きさ50×50mm^{2}の黄銅製平板を用いた。針－平板電極間の距離（ギャップ長）dは，d=0.5mmあるいはd=1.0mmとした。この針－平板電極間に大きさ18×18mm^2，厚さa=0.5mmの固体絶縁バリアを挿入した。また，針先端直下からバリアの端までを沿面距離Lとし，L=0~9mmの範囲で変化させた。この電極系を黄銅製容器内に設置し，排気・減圧した後，ガス圧P=0.1～0.3MPaの範囲でN_2/SF_6混合ガスを封入した。

針－平板電極間に，μs方形波パルス電圧(波頭長

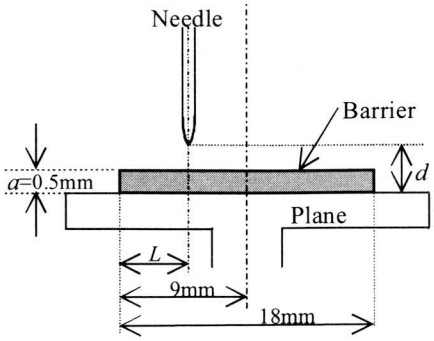


図1　電極配置
Fig.1 Electrode configuration

T_f=1.5~55μs,最大波高値V_p=35kV)を印加し，そのパルスの波頭部でフラッシオーバを起こさせた。このパルス波頭部でフラッシオーバが生じた瞬間をフラッシオーバ電圧とした。また，パルス電圧の波頭部でコロナ発光が観測され始める電圧をコロナ開始電圧とした。このときの電圧波形およびコロナ発光波形は，それぞれ高圧プローブ(HV-P30, DC-50MHz, 岩崎通信機(株))および光電子増倍管(931A, 波長領域 300-650nm,最高感度波長400nm，浜松ホトニクス(株))を介してオシロスコープ(DL-1540, 150MHz, 横河電機(株))で測定した。また，高速ディジタルフレーミングカメラ(IMACON468: 波長領域 385-900nm, HADLAND PHOTONICS LTD.)を用いて黄銅製容器の窓を通して，フラッシオーバに至る沿面放電路を撮影した。

3．実験結果および考察

3.1 フラッシオーバ電圧におけるバリアの影響

電極間距離d=1.0mm，ガス圧P=0.3MPaにおける針－平板電極におけるフラッシオーバ電圧(FOV)のSF_6ガス混合比依存性を図2に示す。ここで，混合比Dは全ガス圧Pに対するSF_6ガスの分圧の比である。また，FOVは同一条件で10回測定を行い平均値および最大・最小値を図中に示している。正極性（針電極が正極の場合）のN_2ガス(D=0%)中にけるFOVは約6kV，また，負極性（針電極が負極の場合）では約8kVである。正・負両極性において，SF_6ガスの混合比の増加とともにFOVは増大する。FOVの増大は，低SF_6混合比領域（0<D<30%）で顕著で，3%のSF_6混合によっても，FOVの上昇が認められた。しかしながら，D=30%以上の混合比領域ではN_2ガスへのSF_6混合によるFOVの上昇効果は飽和傾向を示した。また，ガス圧をP=0.1MPa, 0.2MPaと変化させた場合，P=0.3MPaの場合に比べてFOVは低くなるものの，FOVのSF_6ガス混合比依存性は同様のものとなった。さらに，いずれの混合比においても，FOVは正極性に比べ負極性の方が高く，極性効果も認められた。これらのN_2ガスへのSF_6混合におけるFOVの変化は，宅間らによる準平等電界下の結果と一致している[5]。

次に，針－平板電極間に固体絶縁物バリアを挿入した場合の，ガス圧P=0.3MPaにおける，沿面フラッシオーバ電圧(FOV)のSF_6混合比依存性を図3に示す。正極性の場合，沿面FOVはSF_6の混合比の増大とともに上昇する。しかし，N_2ガス中の沿面FOVとSF_6ガス中の沿面FOVの差は約5kVであり，固体絶縁物バリアを挿入していない針－平板電極系ほどSF_6ガスの混合による沿面FOVの上昇は顕著ではない。さらに，混合比に比例して沿面FOVは上昇しているように見えるが，SF_6を3%混合したN_2/SF_6(D=3%)混合ガスの場合，針－平板電極において見られた 沿面FOVの上昇は認められない。

一方，負極性では，特異な沿面FOVのSF_6混合比依存性が得られた。即ち，N_2ガスにSF_6ガスをわずか3%混合しただけで，沿面FOVは，N_2ガス中(D=100%)の値に比べ，約10kVも低下した。しかし，SF_6ガスの混合比Dをさらに増大させると沿面FOVはほぼ混合比に比例して上昇した。即ち，沿面FOVはSF_6の混合比に対して極小値を持つことがわかった。

図4にはガス圧P=0.1～0.3MPaにおけるSF_6ガスの低混合比領域での負極性沿面FOVの変化を示している。ガス圧P=0.2，0.3MPaでは，0.5%のSF_6の混合によっても,沿面FOVはN_2ガス中の値に比べ，各々5kV，10kVの低下が見られた。また，ガス圧P=0.1MPaにおいて，2~3kVとわずかではあるが沿面FOVの低下が確認された。すなわち，負極性においてはわずか0.5%のSF_6の

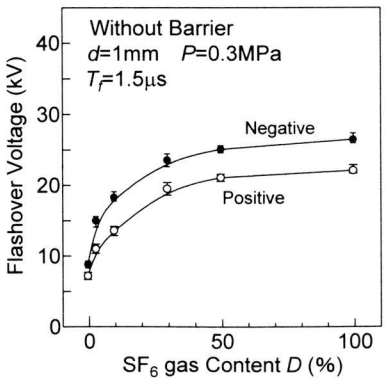


図2　針－平板電極でのフラッシオーバ電圧のSF_6混合比依存性
Fig.2 Dependence of flashover voltage on SF_6 gas content for needle-plane electrode configuration.

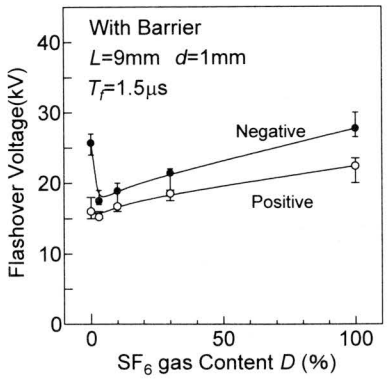


図3　沿面フラッシオーバ電圧のSF_6混合比依存性
Fig.3 Dependence of creeping flashover voltage on SF_6 gas content.

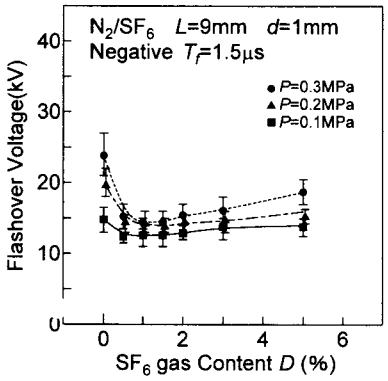


図4　SF_6微量混合域での沿面フラッシオーバ電圧の変化
Fig.4 Change in creeping flashover voltage at low SF_6 gas content.

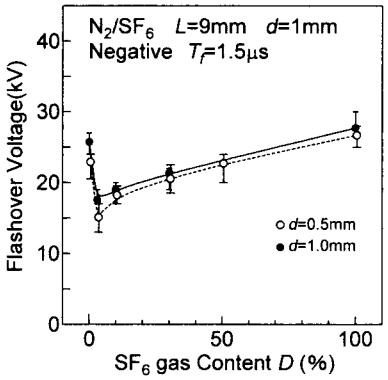


図5　異なる電極間距離における沿面フラッシオーバ電圧のSF_6混合比依存性
Fig.5 SF_6 gas content dependence of creeping flashover voltage for various electrode distances.

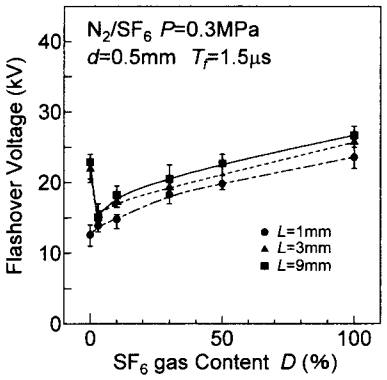


図6　沿面フラッシオーバ電圧のSF_6混合比依存性に及ぼす沿面距離の影響
Fig.6 Effect of creeping distance on SF_6 gas content dependence of creeping flashover voltage.

混合によっても,沿面FOVは大幅に低下し，混合比D=1%付近で沿面FOVは最低となることも明らかとなった。さらに，混合比DがD=0.5~3%における沿面FOVのガス圧依存性は，N_2(D=0%)やN_2/SF_6(D=5%)に比べ，極めて小さいこともわかる。

正極性についてもSF_6微量混合域の沿面FOVについて調べたところ，0.5%～1%のSF_6の混合により沿面FOVはN_2ガス中の値より1~2kVとわずかに低下する傾向は得られたものの，負極性に見られる大きな変化は現れなかった。

このようなSF_6の混合によるFOVの低下は，N_2/SF_6混合ガス，air/SF_6混合ガス，CO_2/SF_6混合ガス中の固体絶縁バリアのない不平等長ギャップ放電においても報告例がある[10,11,21]。その中で，渡辺らは，正・負両極性においてFOVの低下が見られ，FOVの低下はコロナ安定化作用が弱くなるためと説明している。しかしながら，本実験の結果は，上記報告とは大きく異なっている。すなわち，バリアを配置していない針－平板電極におけるFOVのSF_6混合比依存性においては,FOVの低下は見られず，針－平板電極間に固体絶縁物バリアを配置した場合,負極性においてのみ,その沿面FOVに大幅な低下が見られる。また，コロナ安定化作用の変化に特徴的なFOVの圧力依存性も見出されていない。したがって,本研究における沿面FOVの低下は，コロナ安定化作用に直接起因したものと説明することはできない。一方,Safarらは,FOVの低下の原因が,N_2/SF_6混合ガス系における特異な光電子特性に関連したものと指摘している。しかしながら，その詳細については明らかにされていない。

3.2 沿面FOVに及ぼすギャップ長，沿面距離の影響

次に，ギャップ長dおよび沿面距離Lが沿面FOVに及ぼす影響について検討を行った。沿面距離L=9mm，ガス圧P=0.3MPaの条件下で，ギャップ長d=0.5mmにおける負極性沿面FOVのSF_6混合比依存性を，ギャップ長d=1.0mmの場合と比較して図5に示す。この条件において，いずれのSF_6ガス混合比においても，d=0.5mmにおける負極性沿面FOVの値はd=1.0mmよりも低いものとなっている。しかしながら，d=0.5mmにおいても，3%のSF_6ガスの混合によって,負極性沿面FOVは大幅に低下した。d=1.0mmの場合のフラッシオーバには，針先端から固体絶縁物バリア表面へガスギャップ中をコロナが進展する過程と固体絶縁物バリア表面上での沿面コロナの進展過程の二つを考慮する必要がある。一方，d=0.5mmの場合，針電極の先端は，固体絶縁物バリアに接しており，ガスギャップ層は取り除かれた構成となっている。d=0.5mmにおいてもd=1.0mmの場合と同様に，SF_6の微量混合によって，負極性沿面FOVが低下したことは，沿面FOVの低下が固体絶縁物バリア上を沿面コロナが進展する過程に関係しているものと理解される。

図6に電極間距離d=0.5mm，ガス圧P=0.3MPaにおける各種沿面距離Lについての負極性沿面FOVのSF_6混合比依存性を示す。沿面距離L=1mmにおけるSF_6の混合比依存性は，針－平板電極のみの時と同様に，D=10%以下のSF_6混合比領域においても沿面FOVの上昇が見られる。一方，L=3~9mmでは，N_2にSF_6を3%混合することにより,沿面FOVの著しい低下が引き起こされる。即ち，沿面距離Lの増大に伴い，負極性沿面FOVに対する微量混合域におけるSF_6混合の効果は，正の効果（FOVの上昇）から負の効果（FOVの低下）に変化することがわかった。即ち，SF_6の混合の効果が正から負に変わる沿面距離Lの閾値が存在することが明らかとなった。

以上の結果より,N_2へのSF_6混合における負極性沿面FOVの低下は，ガス圧により沿面コロナの進展過程が変化することに関連しているものと考えられる。

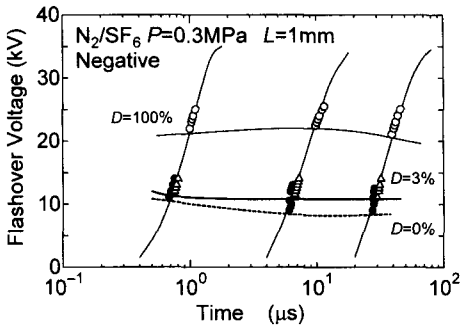
3.3 沿面フラッシオーバ電圧，コロナ開始電圧－時間特性

SF_6の微量混合によって負極性沿面FOVが大幅に低下する原因を明らかにするため，沿面FOVおよびコロナ開始電圧(COV)の電圧－時間特性(V-t特性)の検討を行った。図7はガス圧P=0.3MPa，沿面距離L=1mmおよびL=9mmにおいて，印加パルス電圧の波頭長T_fを変化させて得られた沿面FOVおよびCOVのV-t特性である。

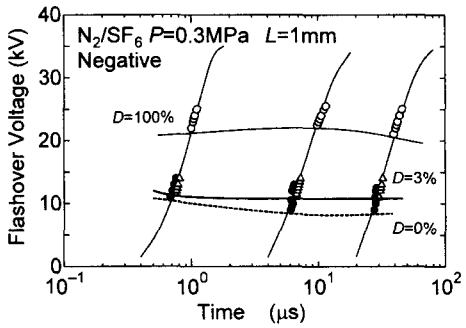
SF_6混合によって負極性FOVが上昇した沿面距離L=1mmの場合，図7(a)に示すように，いずれの波頭長においても，N_2/SF_6(D=3%)混合ガス中の沿面FOVはN_2(D=0%)ガス中の沿面FOVよりも上昇している。また，FOVの波頭長T_fによる変化も針－平板電極のみの結果と同じである[13,14]。

一方，沿面距離L=9mmにおけるV-t特性を図7(b)にした。N_2/SF_6(D=3%)混合ガス中あるいはSF_6(D=100%)ガス中の沿面FOVは，波頭長T_fが長くなっても変化しないか，あるいはわずかに低下する。一方，N_2(D=0%)ガス中におけるV-t特性は，N_2/SF_6(D=3%)混合ガス中あるいはSF_6(D=100%)ガス中のものと異なっている。すなわち，沿面FOVは10μs付近で最大となる。この理由は現段階では明らかではない。しかしながら，少なくとも，今回検討を行った波頭長では波頭長に関係なくN_2/SF_6(D=3%)中の沿面FOVは，N_2(D=0%)中の値より低い。したがって，SF_6の微量混合による沿面FOVの低下は，放電プロセスにおける時間遅れが原因ではないと考えられる。

沿面距離L=9mmにおいて，光電子増倍管を用いたコロナ発光の検出により測定したコロナ開始電圧(COV)のV-t特性を同じく図7(b)に示した。いずれの混合比のガス中においても，波頭長が長くなるとCOVはわずかに低下するか，あるいは変化が見られないV-t特性となっている。このCOVのV-t特性も，これまでに報告している針－平板電極のみの結果と同じである[13,14]。また，波頭長に関係なく，COVはSF_6の混合により上昇し，COVのSF_6混合比依存性をより詳細に調べた結果，COVは低SF_6混合比領域で上昇し，その後SF_6の混合比とともに徐々に上昇する結果が得られている。このCOVのSF_6ガス混合比依存性は，負極性沿面FOVのSF_6ガス混合比依存性と大きく異なっている。この結果からも，負極性沿面FOVのSF_6ガス混合による低下が，コロナ発生段階ではなく，コロナが進展する過程に起因していることが支持される。



(a) L=1mm



(b) L=9mm

図7　沿面フラッシオーバ電圧，コロナ開始電圧－時間特性
Fig.7 Voltage-time characteristics on fcreeping flashover voltage and corona onset voltage.

3.4 ガス圧の影響と沿面放電進展形態

ギャップ長d=1mm，沿面距離L=3mmにおけるN_2ガス(D=0%)およびN_2/SF_6(D=3%)混合ガス中での負極性沿面FOVのガス圧依存性を図8に示した。いずれのガス中においてもガス圧Pの上昇とともに負極性沿面FOVも高くなるが，N_2/SF_6(D=3%)混合ガス中のガス圧依存性は非常に小さい。その結果，沿面距離L=3mmにおける沿面FOVに及ぼすSF_6混合の効果はガス圧Pに大きく左右される。即ち，ガス圧PをP=0.1MPaからP=0.3MPaへと上昇させるにともない，SF_6の混合が負極性沿面FOVに及ぼす効果は正から負に変化する。このN_2/SF_6混合ガス中の沿面FOVに見られる小さな圧力依存性が，SF_6混合による負の効果を導く要因と考えられる。

また，コロナが固体絶縁物沿面を進展する過程が関与していることも示唆されている。そこで，ガス圧によって，SF_6ガス混合比依存性が大きく変化する沿面距離L=3mmの条件下における，N_2/SF_6(D=3%)ガス中の沿面放電の進展形態を斜め上から駒撮りした。フラッシオーバ直前（直前50ns間）の沿面放電像を図9に示した。また，比較としてN_2(D=0%)ガス中およびSF_6(D=100%)ガス中の沿面放電像も示した。

先ず，SF_6の混合によって負極性沿面FOVが上昇するN_2/SF_6(D=3%)，ガス圧P=0.1MPaにおいては，沿面コロナがバリア上を広く進展している様子がわかる。また，このコロナの進展形態は，ガス圧P=0.1，0.3MPaのN_2(D=0%)ガス中におけるものとほぼ同じであることもわかる。一方，SF_6の混合によって負極性沿面FOVが大きく低下したガス圧P=0.3MPaのN_2/SF_6(D=3%)中では，針先からのコロナが沿面に達した後，コロナは数本に分かれ，バリア沿面を進展する。さらに，ガス

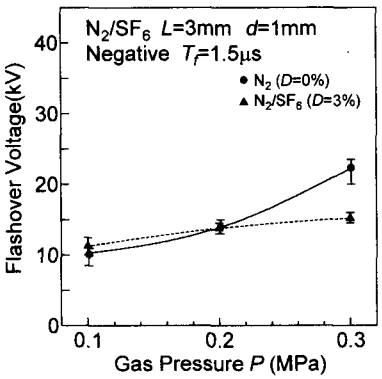


図8　N_2/SF_6混合ガス中の沿面フラッシオーバ電圧のガス圧依存性
Fig.8 Pressure dependence of creeping flashover voltage in N_2/SF_6 gas mixtures.

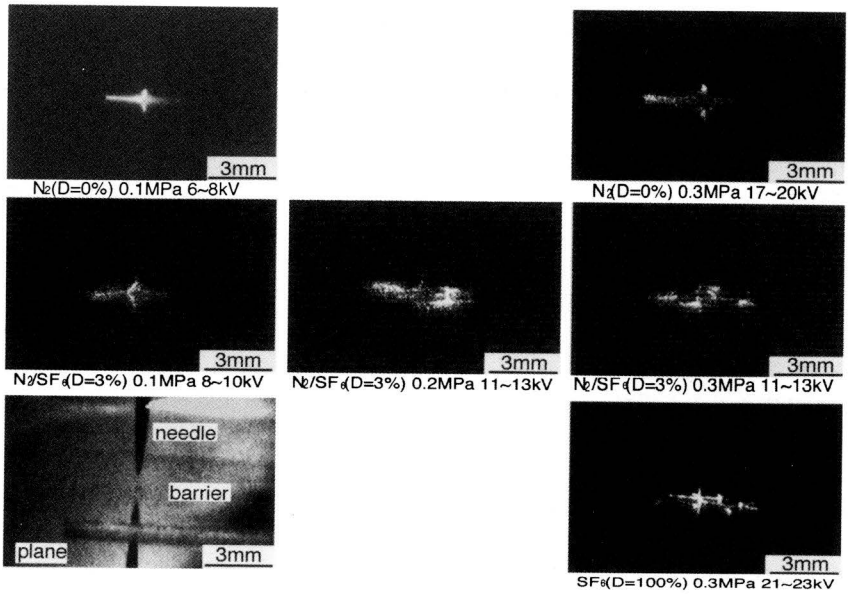


図9　N_2/SF_6混合ガス中における沿面放電像
Fig.9 Creeping discharge images in N_2/SF_6 gas mixtures.

圧P=0.3MPaのN_2(D=0%)ガス中やSF_6(D=100%)ガス中の沿面コロナでは見られない沿面コロナ先端での球状の強い発光領域が観測され，バリア上を進展する沿面コロナ先端で電離が活発に行われていることがわかる。

また，SF_6の混合によって沿面FOVに変化が見られないガス圧P=0.2MPaにおける沿面コロナの様子は，ガス圧P=0.1MPaおよびガス圧P=0.3MPaの両者の中間的なものであることもわかる。即ち，ガス圧P=0.1MPaとガス圧P=0.3MPaのN_2/SF_6(D=3%)中における負極性沿面FOVの差はわずか3kVであるにもかかわらず，その沿面コロナ進展形態は大きく異なっている。また，沿面コロナの進展形態の変化は，SF_6の混合が沿面FOVに及ぼす効果の変化とも対応しており，沿面コロナ先端の強い発光が沿面FOVの低下に強く関係しているものと考えられる。

図10にギャップ長d=1.0mm，沿面距離L=9mmにおける各種混合比Dのガス中におけるコロナ発光の時間変化（コロナ発光波形）を示す。ここでは印加パルス電圧の波高値V_pは，波頭長T_f=1.5μsにおけるN_2/SF_6(D=3%)中の負極性沿面FOVよりわずかに低い値であるV_p=15kVとした。

図10(a)は N_2(D=0%)ガス中のコロナ発光波形を示しているが，電圧印加の初期段階における強くシャープな発光とそれに続く比較的ブロードな発光の2種類の発光ピークが観測された。また，図10(d)に示すSF_6(D=100%)ガス中では，沿面コロナのステップ進展に対応すると考えられる複数のパルス状発光が観測された。また，その発光強度もN_2(D=0%)ガス中と比べ2桁も弱い。一方，図10(b)に示したN_2/SF_6(D=3%)混合ガスにおいては，SF_6(D=100%)ガス中で見られた弱いパルス状の発光は観測されず，N_2ガスの場合と同様に，強くシャープな発光とそれに続くブロードな発光が見い出され，その発光強度にも変化は見られなかった。

さらに，N_2/SF_6(D=3%)中に見られるブロードなコロナ

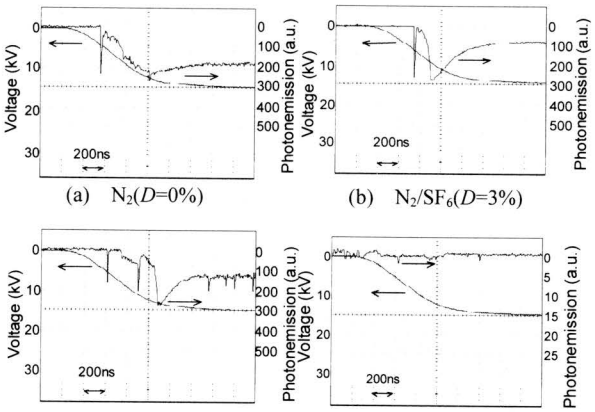


図10　N_2/SF_6混合ガス中におけるコロナ発光波形
Fig.10　Photonemission by corona in N_2/SF_6 mixtures.

発光は，N_2(D=0%)ガス中の発光に比べ，尖鋭化している。これは，同じ電圧においてもN_2/SF_6(D=3%)中では，N_2(D=0%)中に比べ沿面コロナが進展していることを示しており，沿面放電像における沿面コロナ先端の強い電離・発光と対応するものと考えられる。

さらに，混合比D=10%におけるコロナ発光波形を図10(c)に示しているが，この場合，N_2(D=0%)ガス中に見られる発光パターンとSF_6(D=100%)ガス中で見られる発光パターンの両方が観測される。また，混合比Dをさらに大きくすると，コロナ発光波形はN_2(D=0%)ガス中で見られるパターンは消失し，SF_6 (D=100%)中で見られる発光パターンに変化した。

以上の結果から，負極性沿面FOVの低下の原因を考える。本構成での沿面ストリーマ先端電界は高いものと考えられるが，SF_6では2～3eVのエネルギーの電子に対する電子付着係数は，1eV以下の電子に比べ約3桁

小さく，また4eV以上の電子に対しても1桁小さい[21]。したがって，付着による負イオンの形成は少なく，また負イオンが形成されたとしても，付着電子は，低いエネルギー(0.05eV)で離脱可能である[22]。即ち，SF_6^-による沿面放電進展の抑制効果はなく，N_2/SF_6(D=3%)ではSF_6(D=100%)に見られるパルス状発光も観測されない。

さらに，SF_6の微量混合において，負極性沿面FOVの圧力依存性が小さく，実効電離係数α-η/Pのガス圧に対する変化が少ないものと言える。ここで，αは電離係数，ηは付着係数である。既に述べたように，バリア上の沿面コロナ先端でN_2の電離が活発である。また，電気的負性ガスを含む混合ガス中では，電子－イオン再結合は主にバリア表面で起こる。したがって，励起，再結合や電離により生成されるフォトンはバリア沿面に存在するものと考えられる。また，SF_6ガス混合は紫外域での光吸収係数を増大させることも報告されており[23]，フォトンが効率的に吸収され，ストリーマ先端近傍で光電離が起こりやすいものと推測される。したがって，ガス圧の上昇に伴い，光電離前後における沿面コロナ先端近傍の分子や荷電粒子の密度は上昇し，これがフラッシオーバ過程に影響を与えているものと考えられる。このことにより，N_2ガスへのSF_6ガスの微量混合では，N_2ガス中に比べ沿面コロナは進展しやすく，沿面FOVも低くなったものと考えられる。

4．まとめ

針－平板電極間の微小ギャップに固体絶縁バリアを挿入した複合絶縁構成おいて，N_2/SF_6混合ガス中でのパルス電圧による沿面フラッシオーバ特性について調べた。本研究で得られた結果をまとめると以下のようになる。

(1) 針－平板電極間に固体絶縁物バリアを挿入した場合，N_2にわずか0.5%のSF_6ガスの混合によって，負極性沿面FOVの大幅な低下が引き起こされる。

(2) 沿面距離の増加とともに，負極性沿面FOVにおけるSF_6の微量混合の効果は，正から負に変化した。また，負の効果は，ガスギャップの存在の有無にかかわらず現れ，この負の効果は，沿面コロナ進展過程に関連したものであることがわかった。

(3) 沿面距離L=3mmの場合，ガス圧の上昇に伴い，その沿面コロナの進展形態は，弱くブロードなものから，沿面コロナ先端部に強い発光領域が観測されものに変化した。また，SF_6混合の効果と対応することがわかった。

(4) N_2/SF_6(D=3%)混合ガス中におけるコロナ発光波形は，N_2(D=0%)混合ガス中のコロナ発光パターンと同一であり，SF_6混合による負イオンの放電抑制効果は認められない。また，沿面コロナ先端での光電離等により沿面の荷電粒子密度が高くなり，コロナの進展が容易となるため，負極性沿面FOVが低下したものと理解できる。

参考文献

[1] W.T.Shugg: *Handbook of Electrical and Electronic Insulating Materials*, Second Edition, IEEE Press, NY, 1995.

[2] T.Nitta and Y.Shibuya: IEEE Trans., **PAS-90**, 1065 (1971).

[3] A.H.Cookson and O.Farish: IEEE Trans., **PAS-92**, 871 (1973)

[4] L.Niemeyer and F.Y.Chu: IEEE Trans., **EI-27** (1992).

[5] T.Takuma, T.Watanabe and K.Kita: Proc. IEE, **119**, 927 (1972).

[6] P.J.Chanrty and R.E.Wooton: J. Appl. Phys., **52**, 2731 (1981).

[7] S.R.Hunter and L.G.Christopjorou: J. Appl. Phys., **57**, 4377 (1985).

[8] S.Okabe and T.Kohno: Jpn. J. Appl. Phys., **24**, 836 (1985).

[9] L.G.Christophorou and R.J.Van Brunt: IEEE Trans., **DEI-2**, 952 (1995).

[10] T.Watanabe and T.Takuma: J. Appl. Phys., **48**, 3281 (1977).

[11] Y.A.Safar, N.H.Malik and A.H.Qureshi: IEEE Trans., **EI-17**, 441 (1980).

[12] Al-Bawy and O.Farish: IEE Proc. A , **138**, 145 (1991).

[13] H.Nakayama, M.Onoda, S.Kuroda and K.Amakawa: Jpn. J. Appl. Phys., **27**, 1782 (1988).

[14] H.Nakayama, M.Onoda, S.Kuroda and K.Amakawa: Jpn. J. Appl. Phys., **29**, 1550 (1990).

[15] H.Nakayama, M.Onoda, T.Nishida, T.Kubota, H.Kamatani and K.Watabe: Jpn. J. Appl. Phys. **35**, 4079 (1996).

[16] 渡部，釜谷，小林，小野田，中山：and H.Nakayama, 電気学会論文誌，**117A**, 1090 (1997)

[17] 渡部，増岡，小野田，中山：電気学会論文誌，**117A**, 893 (1997).

[18] 上野，渡部，中山：静電気学会誌，**23**, 266 (1999).

[19] H.Ueno, H.Ohnishi, K.Tada, M.Onoda and H.Nakayama: Jpn. J. Appl. Phys., **38**, 4182 (1999).

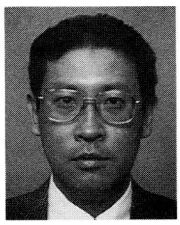
[20] 渡部，四宮，上野，小野田，中山：電気学会論文誌，**119A**, 6 (1999).

[21] S.R.Hunter, J.G.Carter and L.G.Christophorou: J. Chem. Phys., **90**, 4879 (1989).

[22] 候，細川，宮本，森田，金田：電気学会論文誌，**117B**, 1189 (1997).

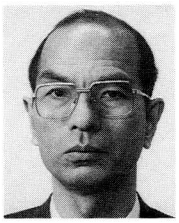
[23] D.T.A.Blair, N.M.MacLeod and J.S.Orr: Proc. 4th. Int. Conf. Gas Discharge, IEE London, p.401 (1978).

(2000年1月10日受理)



上　野　秀　樹

昭和35年10月2日生。昭和60年3月信州大学大学院工学研究科修士課程修了。昭和63年3月大阪大学大学院工学研究科博士後期課程修了。同年3月住友電気工業入社。平成9年10月姫路工業大学工学部電気工学科助教授。現在に至る。主に，沿面放電，複合絶縁に関する研究に従事。工学博士。



中　山　博　史

昭和18年3月14日生。昭和40年3月姫路工業大学電気工学科卒業。平成3年10月同大学工学部電気工学科教授。現在に至る。平成10年4月から2年間同大学学生部長。主に，気体および固体誘電体の絶縁破壊に関する研究に従事。工学博士。